

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Казанский государственный  
энергетический университет

**ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И  
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Практикум

для студентов направления подготовки 11.03.04  
«Электроника и наноэлектроника»

Казань 2024

УДК 621.3.01

ББК

**Женжурист И.А.**

Технология материалов и элементов электронной техники:  
Практика ч. 2 / Сост.: Женжурист И.А. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т,  
2024.– с.

Приведены необходимые сведения о структуре и свойствах материалов электронной техники, даны методические рекомендации по выполнению практических работ, связанных с изучением структуры и свойств материалов электронной техники.

Практикум ч. 2 содержит пять практических работ и предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 11.03.04 “Электроника и наноэлектроника”. Методические указания направлены на выработку умения использовать физико-химические закономерности материалов электронной техники в профессиональной деятельности, применять методы расчета основных параметров материалов и анализа результатов исследований, составления отчета по выполненной работе.

Продолжительность каждой практической работы - 2 часа.

УДК 621.3.01

ББК

© Женжурист И.А. 2024

© Казанский государственный энергетический университет, 2024



## Введение

«Технология материалов и элементов электронной техники» относится к общепрофессиональному циклу и на неё опираются практически все следующие за ней дисциплины в учебных планах «Технология новых материалов», «Композитные материалы», «Технология подготовки производства материалов электроники», «Наноматериалы и нанотехнологии».

Полученные в результате обучения знания необходимы студентам при подготовке, выполнении и защите выпускной квалификационной работы и при решении научно-исследовательских, проектно-конструкторских, производственно-технологических, организационно-управленческих задач в будущей профессиональной деятельности.

В структуру дисциплины в соответствии с учебным планом входят как теоретические (лекционные), так и прикладные (практические) занятия.

Цель практических занятий – освоение информации, полученной на лекциях и выработка определенных умений, связанных с изучением электрических и магнитных свойств различных материалов; выполнении практических расчетов в области определения параметров, характеризующих свойства электротехнических материалов.

Практические занятия бывают двух типов: в виде семинара по соответствующей теме или расчётно-графической работы. Для данных дисциплин согласно рабочим программам целесообразнее проводить практические занятия в виде расчётно-графических работ, на которых рассматривается решение задач, по темам, позволяющим исследовать электропроводящие и магнитные свойства материалов.

### ***Общие требования к оформлению отчетов***

Отчет по работе должен состоять из следующих разделов:

1. Цель работы.
2. Теоретические положения.

Раздел должен содержать необходимые определения, их объяснение и формулы расчета приведенных характеристик или параметров.

3. Практическая часть.

В данном разделе следует приводить полное решение задач своего варианта, который либо соответствует номеру студента в списке группы либо последней цифре в шифре зачетной книжки в зависимости от количества вариантов. Полученные результаты необходимо обязательно свести в таблицу или график.

4. Ответы на приведённые в конце описания работы контрольные вопросы.

# **Практическая работа № 1**

## **Расчет шихты для синтеза стекла.**

### **Физико-химические свойства стекол.**

**Цель занятия:** приобретение навыков расчета шихты для синтеза стекла, свойствам стекол и знаний по фокусирующим элементам интегральной оптики.

#### **Теоретическая часть работы**

Под стеклом понимают аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава, обладающие в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твердых тел [1].

Под шихтой понимают однородную смесь предварительно подготовленных (обогащенных) и взвешенных по заданному рецепту компонентов. Шихта должна быть однородной и соотношение сырьевых материалов в ней должно быть одинаковым и соответствовать составу. Основными условиями получения правильно подготовленной шихты являются: применение обогащенных и подготовленных материалов, точная дозировка, тщательное перемешивание до полной однородности, подача и загрузка. Сырьевые материалы подразделяются на две группы: основные и вспомогательные материалы.

К основным сырьевым материалам относятся вещества, с которыми в стекломассу вводятся кислотные, щелочные и щелочноземельные окислы. Эти материалы образуют основу стекла и определяют его основные свойства.

К вспомогательным сырьевым материалам относятся вещества, способствующие ускорению варки стекла, улучшению качества стекломассы, изменению характеристик стекла – это ускорители варки, окислители и восстановители, глушители, красители и обесцвечивающие вещества.

К сырьевым материалам предъявляется ряд требований, касающихся постоянства химического и зернового состава, однородности, влажности и содержания в них нежелательных примесей. Колебания химического состава сырья негативно сказываются на однородности стекла, поэтому в таких случаях необходимо корректировать состав шихты. Сырьевые материалы, взвешенные в определенном количестве в соответствии с расчетом шихты, подлежат дальнейшему смешиванию до однородного состояния. Для этого предназначены различные мельницы или смесители.

Подготовленная шихта загружается в тигли и помещается в печь для варки стекла. Термический процесс, в результате которого смесь разнородных компонентов образует однородный расплав, называется стекловарением.

Сыпучую или гранулированную шихту нагревают в ваннах или других печах, в результате чего, она превращается в жидкую стекломассу, претерпевая сложные физико-химические взаимодействия компонентов, происходящие на протяжении значительного температурного интервала. Именно поэтому, нельзя к процессу получения стекла применить термин

«плавление», поскольку компоненты шихты плавятся при разных температурах и, взаимодействуя друг с другом при повышенных температурах, образуют в конечном счёте особое состояние вещества в расплаве – стекло. Это особое состояние стекла подчеркивается и тем, что у него нет точки плавления подобно другим соединениям и простым веществам, у него есть только «интервал размягчения».

Различают пять этапов стекловарения: силикатообразование, стеклообразование, осветление (дегазация), гомогенизация (усреднение), студка (охлаждение).

**Силикатообразование.** На этой стадии происходит начало взаимодействия компонентов шихты и образование силикатов – соединений компонентов шихты с кремнием.

**Стеклообразование.** Образовавшийся на первом этапе спек с повышением температуры плавится, завершаются реакции силикатообразования, происходит взаимное растворение силикатов. В расплаве силикатов идет весьма медленное, постепенное растворение избыточного кварца, составляющее главное содержание этого этапа. К концу этапа появляется прозрачный не однородный по составу расплав, включающий много пузырей. Для обычных стекол этот этап завершается при 1200–1250 °С.

**Осветление.** В течение этого сложного этапа из расплава удаляются видимые газовые включения: крупные и мелкие пузыри. Для обычных стекол этот этап завершается при 1500–1600 °С.

**Гомогенизация.** На этом этапе происходит усреднение расплава по составу, он становится химически однородным. Гомогенизация и осветление протекают одновременно при одних и тех же температурах.

**Студка.** На данном этапе происходит подготовка стекломассы к формованию, для чего равномерно снижают температуру на 300–400 °С и добиваются необходимой для выработки вязкости стекла. Разделение процесса стекловарения на пять этапов является условным.

В общем виде процессы, протекающие при нагревании шихты, можно представить следующим образом. На ранних стадиях нагревания между компонентами шихты начинаются реакции в твердой фазе, приводящие к появлению новых образований и слабому спеканию зерен шихты. С повышением температуры в зонах контакта зерен появляется эвтектическая жидкость, идет термическая диссоциация компонентов, начинается силикатообразование и возрастает степень спекания зерен шихты (стадия спека). При дальнейшем нагревании количество жидкости увеличивается за счет легкоплавких компонентов, идут прямые реакции силикатообразования, жидкая фаза становится преобладающей и начинается растворение избыточного кварца.

При еще более высокой температуре завершается растворение кварца, происходит освобождение расплава от газовых включений и он усредняется по составу (стадия жидкости). Далее идет формование заготовок или изделий

из стекломассы тем или иным методом. Существующие разновидности технологических способов формования стекла. Наиболее распространенные способы формования: вытягивание, прокатка, прессование, выдувание, прессовывдувание и флоат-способ, основанный на свободном растекании стекломассы на подложке (расплаве олова). Превращение стекломассы в стеклянные изделия (формование, или выработка) может осуществляться разнообразными способами.

Превращение стекломассы в стеклянные изделия (формование, или выработка) может осуществляться разнообразными способами. Нет другого материала, который допускал бы такое многообразие способов формования, как промышленное стекло. Из стекла можно изготавливать мельчайшие изделия (бисер, миниатюрные электронные лампочки, тончайшее стекловолокно диаметром в доли микрона) и изделия весьма больших размеров и веса (витринные стекла площадью в 15–20 м<sup>2</sup>, диски для телескопов диаметром в несколько метров, высокие стеклянные колонны). Для изготовления каждого изделия можно выбрать наиболее производительный, дешевый и обеспечивающий заданное качество изделий способ выработки. Возможность формования стекломассы в пластичном состоянии связана прежде всего с особенностями изменения ее вязкости в зависимости от температуры. По окончании провара стекломасса становится текучей, а по мере охлаждения – пластичной. Пластичность позволяет расплаву принять заданную форму, после чего изделие охлаждается и затвердевает, сохраняя приданную ему форму.

Для изготовления каждого изделия можно выбрать наиболее производительный, дешевый и обеспечивающий заданное качество изделий способ выработки. Возможность формования стекломассы в пластичном состоянии связана прежде всего с особенностями изменения ее вязкости в зависимости от температуры. По окончании провара стекломасса становится текучей, а по мере охлаждения – пластичной. Пластичность позволяет расплаву принять заданную форму, после чего изделие охлаждается и затвердевает, сохраняя приданную ему форму.

Интервал температур, при которых стекло может быть отформовано, называется интервалом формования или выработки. В этом интервале вязкость стекла изменяется в пределах  $10^2$ – $10^8$  Па·с, а при полном отвердевании становится равной  $10^{12}$  Па·с.

Температуры и вязкости, соответствующие выработке, зависят от состава стекла и способа формования.

В практических условиях для регулирования в нужном направлении продолжительности всего процесса формования и отдельных его этапов необходимо знать скорость твердения стекломассы и возможные технологические способы изменения этого параметра.

Для расчета шихты принимают, что из сырьевых материалов шихты в стекломассу переходят только оксиды, а влага и газы, образующиеся при химических реакциях в шихте, удаляются с продуктами горения топлива, сжигаемого в печи. Многие компоненты при температуре варки стекла частично улетучиваются, и для получения требуемого содержания в составе стекла в шихту их вводят в некотором избытке.

В процессе варки состав шихты претерпевает изменения. Часть компонентов улетучивается, а другая – прибавляется. При расчете шихты это учитывается использованием так называемых шихтных множителей, значения которых найдены опытным путем и имеются в справочной литературе.

Например, кварцевый песок содержит 98 % основного вещества  $\text{SiO}_2$ . В этом случае шихтный множитель вычисляется по формуле:

$$K = \frac{100}{98} = 1,02 \quad (1)$$

Для карбонатов (солей) необходимо рассчитать коэффициенты следующим образом:

$$K = \frac{M_{\text{соли}}}{M_{\text{оксида}}} \quad (2)$$

При расчете состава шихты исходят из заданного химического состава стекла, выраженного в массовых % (масс. %), молярных % (мол. %), молекулярной форме (числе молей), массовых частях (масс. ч.), а также химического состава сырьевых материалов, применяемых для варки стекла.

Обычно шихту рассчитывают на 100 масс. ч. Песка или на 100 масс. ч. стекломассы. Вторым методом предпочтителен, так как дает более ясное представление о составе стекла, а в условиях производства значительно упрощает калькуляцию себестоимости готовой стекломассы.

### Пример расчета

Дан химический состав стекломассы, выраженный в *числах молей*:

$\text{SiO}_2 - 1,131$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,255$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,003$ ;  $\text{CaO} - 0,017$ ;  $\text{MgO} - 0,006$ ;  $\text{K}_2\text{O} - 0,028$ ;  $\text{Na}_2\text{O} - 0,033$ .

### Решение

По Зегеру приравниваем сумму молей оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов к единице.

В нашем случае  $\Sigma (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) = 0,028 + 0,033 + 0,017 + 0,006 = 0,085$ .

Определяем числа молей оксидов, слагающих химический состав керамической массы, после приведения суммы молей оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов к единице:

$$K = \frac{m_M}{\Sigma m_C}, \quad (3)$$

где  $K$  = число молей соответствующего оксида;

$m_M$  - число молей данного оксида до приведения к 1;

$\Sigma m_C$  - сумма молей ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ )

Например, в случае определения числа молей оксида калия  $K_2O$  в приведенном составе:

$$K_2O = \frac{0,028}{0,085} = 0,329 \text{ моль.}$$

### Задание

Рассчитать шихту для синтеза стеклообразного материала указанного состава. Подобрать сырье. Составить технологическую схему получения стекла по приведенному в теоретической части технологическому процессу.

Рассчитать молекулярную формулу стекла, керамической массы и глазури по заданному химическому составу (по правилу Зегера) [2].

Для того, чтобы наглядно показать сложные составы стекол, глазурей и керамических масс быстро установить отношение кислотных оксидов к основным, формулы силикатов записываются развернуто в виде оксидов. Так, например, ортоклаз  $K_2Al_2Si_6O_{16}$  имеет формулу  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ; известково-глиноземистый гранат  $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$  – формулу  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$ ; лейцит  $K_2Al_2Si_4O_{16}$  формулу  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ .

Использование молекулярных формул керамических масс и глазурей облегчает ряд технологических расчетов.

При составлении формул по Зегеру сумму содержащихся в массе или глазури основных оксидов  $R_2O$  ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $Li_2O$  и др.) и  $RO$  ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SrO$  и др.) приравнивают к единице и вычисляют приходящиеся на 1 моль  $R_2O + RO$  число молей полуторных оксидов типа  $R_2O_3$  ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  и др.) и кислотных оксидов  $RO_2$  ( $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $B_2O_3$  и др.). Следовательно, каждый силикат должен отвечать формуле  $1 (R_2O+RO) m \cdot R_2O_3 \cdot n RO_2$ .

### Задание

1. Перевести содержание компонента из молярных % в массовые части. Для этого молярные % необходимо поделить на молекулярную массу оксида и умножить на 100 %. Повторить операцию для всех оксидов.

2. Вычислить сумму массовых частей всех оксидов.

3. Перевести массовые части в массовые %. Для этого массовую часть каждого оксида необходимо поделить на сумму массовых частей и умножить на 100 %.

4. Вычислить сумму массовых % всех оксидов. Сумма в массовых % должна быть равна 100 %.

5. Определить шихтные коэффициенты для всех оксидов с учетом выбранных сырьевых материалов.

6. Составить рецепт шихты в граммах. Для этого необходимо умножить количество в массовых % на шихтные коэффициенты.

7. Вычислить общее количество шихты (г) и пересчитать состав шихты на 100 грамм. Для этого необходимо поделить количество каждого материала (г) на общее количество шихты (г) и умножить на 100.

8. Составить технологическую схему процесса синтеза оксидного стекла.

9. Сформулировать вывод по проведенной работе.

10. Составить формулу Зегера по указаниям преподавателя.

### **Контрольные вопросы**

1. Что принято называть стеклом.

2. Что понимают под шихтой.

3. Какие вещества являются главным сырьевым материалом?

4. Какие вещества являются вспомогательными сырьевыми материалами?

5. Что понимают под подготовкой сырья?

6. Какие процессы проходят при термической обработке?

7. Назовите этапы стекловарения.

8. В чем заключается особое состояние стекла?

9. Назовите физические и химические процессы в стекловарении.

10. Назовите способы приготовления стеклянных изделий.

### **Литература**

1. Колонтаева Т.В. Технология материалов и компонентов электронной техники: учебно-методическое пособие «Технология материалов и компонентов электронной техники»: в 2 ч.Ч. 1: Материалы / Т. В. Колонтаева. – Минск: БНТУ, 2019. – 101 с.

2. Вакалова Т.В. Инженерно-технологические расчеты: методические указания к практическим занятиям/ Т.В. Вакалова, В.М. Погребенков, И.Б. Ревва. – Томск: ТПУ, 2007. – 36 с.

## **Практическая работа № 2**

### **Фокусирующие элементы интегральной оптики**

#### **Расчет величины эффективности сопряжения для волнового слоя поперечного элемента ввода / вывода излучения из волноводов.**

**Цель занятия:** научиться описывать физические процессы, происходящие в интегрально-оптических элементах, приобретение навыков расчета величины эффективности сопряжения для волнового слоя поперечного элемента ввода / вывода излучения из волноводов.

## Теоретическая часть работы

Одним из важных направлений современной оптоэлектроники является интегральная оптика. Интерес к ней вызван возможностью создания надежных и малогабаритных устройств для оптической обработки информации и управления параметрами оптического излучения. На основе оптических волноводных элементов, интегрированных на общей подложке, и управляемых электрическими и оптическими сигналами, возможно создание модуляторов, коммутаторов, логических устройств, процессоров, которые по удельному энергопотреблению и быстродействию могут конкурировать с микроэлектронными аналогами [1-3].

Основу элементной базы интегральной оптики составляют диэлектрические волноводы, конструктивно объединяемые с активными и пассивными элементами: лазерными излучателями, фотоприемниками, линзами, дифракционными решетками. В интегрально – оптических схемах используется не только технологическая интеграция компонентов, но и интеграция различных физических явлений. Это определяет круг используемых в интегральной оптике материалов и необходимость применения прецизионных технологических операций при изготовлении волноводных элементов и структур.

### *Фокусирующие элементы интегральной оптики*

В интегральной оптике фокусирующие элементы относятся к базовым компонентам, выполняемым по планарной интегральной технологии. Волноводные линзы Люнеберга получили свое название по аналогии с известными линзовыми антеннами СВЧ Люнеберга. Такая антенна представляет собой сферу с таким законом изменения показателя преломления в СВЧ-диапазоне, который обеспечивает фокусировку падающего пучка излучения на противоположной стороне линзы.

Известно, что эффективный показатель преломления волновода увеличивается с увеличением толщины. Изменение эффективного показателя преломления с изменением толщины волновода зависит от порядка моды  $m$ .

Линзы, работа которых основана на изменении величины показателя преломления среды  $n_e$  с изменением толщины волновода, обладают абберациями, если в волноводе распространяется более одной моды.

Дифракционные линзы для устройств различного назначения создаются травлением поверхности пленарного волновода или нанесением на нее непрозрачных слоев материала. Дифракционная линза эквивалентна одномерной зонной пластинке Френеля, нанесенной на поверхность волновода или вытравленной внутри него.

На рисунке 1 схематично показан вид сверху на тонкую дифракционную линзу. Зоны могут быть получены, например, созданием в

волноводе слоев с меньшим эффективным показателем преломления в каждой зоне путем травления.

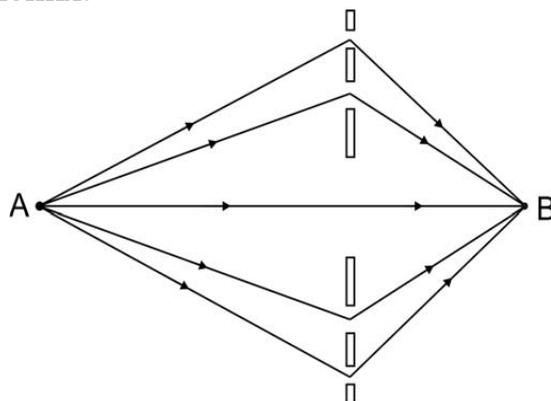


Рис. 1. Волноводная дифракционная решетка (вид сверху).

Длина волны в волноводе равна длине волны в вакууме, деленной на эффективный показатель преломления, поэтому для расчета точных значений параметров линзы необходимо знание эффективного показателя преломления волновода.

Дифракционная линза работает на эффекте дифракции Френеля. Как правило, в классической линзе Френеля фокусировка – это суперпозиция двух эффектов: дифракции Френеля, введение в плоскость дифракции соответствующего фазового сдвига для усиления эффекта интерференции в фокальной точке. В волноводной линзе к этому добавляется и волноводный эффект. Необходимый фазовый сдвиг получают за счет направленного изменения эффективного показателя преломления волновода. Это осуществляется за счет изменения параметров волноводного слоя.

Недостаток волноводных фазовых линз Френеля – это их относительно низкая дифракционная эффективность, не превышающая 35%. Низкую дифракционную эффективность, из-за ступенчатого характера изменения показателя преломления в линзе, можно частично устранить, если параметр волноводного слоя в зоне Френеля изменять по монотонному закону.

Использование тонких слоев активных диэлектриков (сегнетоэлектриков) позволяет создавать планарные оптические решеточные линзы. В отличие от пассивных решеточных линз, где градиент эффективного показателя преломления или толщины волноводного слоя раз и навсегда задается в процессе формирования линзы, в «активной» структуре с сегнетоэлектриком нужное изменение показателя преломления создается за счет электрооптического эффекта при подаче напряжения на систему электро-дов, нанесенных на поверхность электрооптического материала. Дифракционная активность таких линз достигает 90%.

Планарный оптический волновод - это диэлектрический слой на диэлектрической подложке с более низким показателем преломления. Световая волна в нем может распространяться за счет полного внутреннего отражения от границ раздела “ слой-подложка” и “ слой - покровная среда”.

В диэлектрических волноводах возможно существование как излучательных, так и направляемых (волноводных) мод. *Направляемая мода представляет собой бегущую волну в направлении распространения и стоячую – в направлении нормали к плоскости волновода.*

Для изотропного оптического волновода, либо для волноводов на основе одноосных кристаллов, при распространении света вдоль главных осей, направляемые моды имеют чисто поперечно – электрическую (ТЕ мода) и поперечно – магнитную (ТМ мода) структуру.

Планарные оптические волноводы (ОВ) по виду распределения показателя преломления по поперечному сечению делят на пленочные ОВ с близким к ступенчатому закону изменения показателя преломления, и градиентные ОВ с плавным изменением показателя преломления. В пленочных ОВ образование направляемой моды можно рассматривать как результат зигзагообразного распространения плоской однородной световой волны в пленке. В градиентном ОВ световой луч распространяется путем рефракции, по криволинейным траекториям.

При описании характеристик волноводов вводят понятие эффективного показателя преломления направляемой моды  $N_m$ :

$$N_m = b/k_0, \quad (4)$$

где  $b = w/u_\phi$  - постоянная распространения;

$w, u_\phi$ - угловая частота и фазовая скорость волны.

$k_0 = 2\pi / \lambda_0$  – волновое число.

Свойства направляемых мод пленочного волновода определяются дисперсионным уравнением, связывающим их фазовые скорости на заданной частоте с параметрами волноводной структуры, а именно с показателями преломления и толщиной пленки  $d$ .

Это уравнение можно получить, используя строгий электродинамический подход, включающий решение волнового уравнения и удовлетворение граничных условий для тангенциальных составляющих векторов  $E$  и  $H$  на границах раздела. Но можно использовать и менее строгий подход, основанный на лучевой трактовке распространения света в пленке. В конечном итоге, оба метода дают одинаковый результат, поэтому используем здесь последний подход.

### Устройство ввода–вывода излучения

Возбуждение диэлектрических волноводов можно осуществить источниками, расположенными как в поперечном сечении волновода, так и вдоль её поверхности. В первом случае для эффективного возбуждения источник должен воспроизводить структуру поля возбуждаемой моды, во втором – фазовое распределение между источниками должно отвечать изменению фазы поля собственной волны волновода вдоль направления её распространения.

### Призмные элементы связи.

Призмный элемент ввода – вывода излучения использует эффект туннелирования света через тонкий воздушный зазор между призмой и поверхностью волновода. Материал призмы имеет более высокий показатель преломления, чем материал волновода. При выводе излучения энергия волноводной моды в области связи, просачиваясь через воздушный зазор, излучается в призму под некоторым углом. Согласно принципу взаимности, если в призме распространяется световая волна в направлении, противоположном направлению излученной волны, то она, туннелируясь через тот же зазор, может возбуждать в волноводе направляемую моду. Это соответствует работе призмы в качестве элемента ввода. На рис. 2, 3 приведена схема волновода с призмными элементами. При оптимальных условиях эффективность призмных элементов ввода с однородным зазором может достигать 80%, а в случае неоднородного зазора возможна эффективность ввода до 100%.

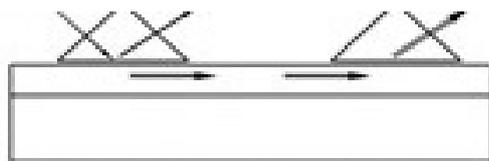


Рис. 2. Схема волновода с призмными элементами

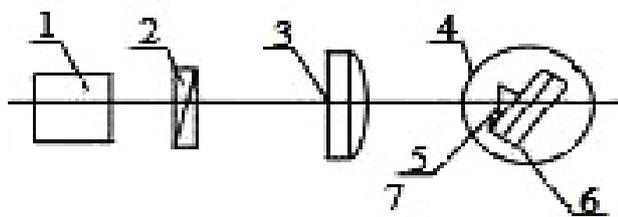


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки.

1 – He – Ne лазер; 2 – поляриод; 3 – линза фокусирующая; 4 – волновод; 5 – призма; 6 – теодолит; 7 – основание.

Установка (Рис. 3) включает He – Ne лазер (1) ( $\lambda=0,63$  мкм), поляризатор (2), линзу (3) и оптический волновод, размещенный на вращающемся столике теодолита 2Т2А. Волновод с призмой устанавливается на теодолит так, чтобы можно было измерить углы ввода излучения в волновод. Положение столика теодолита в горизонтальной плоскости регулируется подъемными винтами. Фокусирующая линза (3) предназначена для повышения эффективности ввода света в планарный волновод и размещается между теодолитом и лазером с поляризатором.

Для ввода излучения в волновод используется призмный элемент (5). С помощью фотодиода измеряется интенсивность светового луча, отраженного от основания призмы. Сигнал с фотодиода подается на микроамперметр.

Регистрация ввода света в волновод осуществляется с помощью фотодиода. Фотодиод может размещаться у выходного торца волновода либо вблизи выводной призмы. При однопризмной схеме эксперимента возможно измерение углов ввода по моментам уменьшения интенсивности светового пучка, отраженного от основания призмы и выходящего из нее. В этом случае эффективность ввода излучения рассчитывается по формуле: Регистрация ввода света в волновод осуществляется с помощью фотодиода. Фотодиод может размещаться у выходного торца волновода либо вблизи выводной призмы. При однопризмной схеме эксперимента возможно измерение углов ввода по моментам уменьшения интенсивности светового пучка, отраженного от основания призмы и выходящего из нее. В этом случае эффективность ввода излучения рассчитывается по формуле (5). Регистрация ввода света в волновод осуществляется с помощью фотодиода. Фотодиод может размещаться у выходного торца волновода либо вблизи выводной призмы. При однопризмной схеме эксперимента возможно измерение углов ввода по моментам уменьшения интенсивности светового пучка, отраженного от основания призмы и выходящего из нее. В этом случае эффективность ввода излучения рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% , \quad (5)$$

где  $I_{\max}$  – ток фотодиода при отстойнике от условия возбуждения моды;

$I_{\min}$  – его ток при возбуждении моды.

Изменив токи  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  можно определить эффективность ввода мод  $h$ .

### **Пример расчета**

Необходимо оценить геометрические размеры и топологию аналоговой линзы Френеля, интегрированной в планарный волновод из кремния.

Толщина волновода 5мкм. Волновод нанесен на слой SiO<sub>2</sub>. Длина волны 1.3мкм. Ширина волновода 30мкм.

Рассчитайте геометрические размеры линзы Френеля, интегрированной в планарный волновод.

**Решение:**

Аналоговая дифракционная линза Френеля, изготовленная как зонная пластина Френеля может быть синтезирована на основе одного оптического материала с показателем преломления  $n^2$ . Такая ступенчатая зонная пластина изменяет фазу колебаний в соседних зонах на  $\pi$ . Для соблюдения этого условия необходимо сделать так, чтобы высота ступеньки  $h$  была равна:

$$h = \frac{\lambda}{2(n_2 - 1)} \quad (6)$$

Радиус  $i$ -й зоны Френеля можно определить из следующего соотношения:

$$r_i = \sqrt{n_2 \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \lambda}, \quad (7)$$

где:  $a_1$  и  $a_2$  – расстояния от источника до зонной пластины и от зонной пластины до изображения, соответственно. Далее из поверхности планарного волновода формируется область, соответствующая топологии зонной пластины с толщиной равной толщине волновода.

**Задание**

1. Длина излучения 1.3мкм. Материалы Si и SiO<sub>2</sub>. Оцените геометрические размеры (радиус) для геодезической и модовой линз имеющих одинаковое фокусное расстояние.

**Контрольные вопросы**

1.Какая структура может играть роль планарного оптического волновода?

2.Каков характер электромагнитного поля в планарном волноводе при существовании в нем направляемой моды?

3.Каковы соотношения между показателями преломления отдельных сред в планарном оптическом волноводе?

4.Поясните, какие составляющие векторов электромагнитного поля характерны для ТЕ мод, а какие – для ТМ мод.

5.Что понимается под дисперсионным уравнением планарного оптического волновода?

6. Что понимают под дифференциальными линзами?

7. Что понимают под направляемой модой?

8. Что понимают под эффективным показателем преломления направляемой моды?

9. По какой формуле рассчитывают эффективность ввода излучения при заданных значениях токов  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ ?

10. Для каких целей используют призмный элемент ввода?

### Литература

1. Григорьев Л.В. Кремниевая фотоника. Учебно-методическое пособие по практическим работам. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 69 с.

2. Егоров А.А., Севастьянов Л.А., Севастьянов А.Л. Исследование электродинамических свойств планарной тонкопленочной линзы Люнеберга»/ Журнал Радиоэлектроники. – 2008. - №6. - С. 52-65.

3. Соيفер В.А. Методы компьютерной оптики. М. Физматлит. - 2003. - 688 с.

## Практическая работа № 3

### Расчет технологических операций процесса

#### термоформирования пластмасс и процесса нагрева тел.

**Цель занятия:** приобретение навыков расчета технологических операций процесса термоформирования пластмасс и процесса нагрева тел.

#### Теоретическая часть работы

Методом термоформования перерабатывают лишь термопластичные листовые полимеры [1-3].

Изделия из листовых термопластов могут изготавливаться различными методами: *штампованием, формованием с проскальзыванием листа в прижимной раме, пневмоформованием и вакуумформованием.*

При *штамповании* лист термопласта нагревают до температуры размягчения, а затем формируют с помощью матрицы и пуансона.

При формовании способом *проскальзывания листа в прижимной рамке* разогретая листовая заготовка натягивается на выпуклую (позитивную) форму и оформляется в изделие пневматическим прессом с верхним и нижним давлением.

При *пневмоформовании* листовую заготовку закрепляют по периметру формы прижимной рамой, нагревают излучающими электронагревателями до температуры, при которой термопласт переходит в высокоэластическое состояние, и затем формируют на позитивной или негативной форме с помощью подогретого сжатого воздуха. После охлаждения, необходимого для фиксации формы изделия, его удаляют из формы. Преимуществом пневмоформования является возможность использования высокого давления формования (0,15 – 2,5 МПа), что способствует переработке толстостенных листовых заготовок и получению крупногабаритных изделий. При этом

способе формования изделия имеют четкий контур и обладают высокой точностью размеров. Изделия получают с хорошей равнотолщинностью.

При *вакуум-формовании* листовая заготовка закрепляется по периметру формы прижимной рамкой, нагревается плоскими радиационными электронагревателями до высокоэластического состояния и затем формуется под давлением, которое создается за счет разности между атмосферным давлением и разряжением, возникающим в формующей полости между поверхностью листа и формой при отсасывании из нее воздуха вакуум-насосом. Практически давление составляет 0,06 – 0,085 МПа. Его обычно достаточно для формования листов толщиной до 5 мм. Далее изделие охлаждается для фиксирования формы, а затем удаляется.

Для изготовления глубоких изделий сложной формы применяют различные комбинированные способы, при которых используют и механическую вытяжку пуансонами и пневмовакуумформование.

Машины для термоформования могут быть одно- и многопозиционными. Последние отличаются тем, что основные технологические операции, требующие наибольшей затраты времени (процессы нагрева листовой заготовки, формования и охлаждения изделий) осуществляются одновременно в различных рабочих позициях.

Наибольшее распространение получили трехпозиционные револьверные (карусельные) машины. Основным рабочим органом такой машины является ротор с укрепленными на нем тремя прижимными рамами. В первой позиции листовая заготовка зажимается прижимной рамой, после чего ротор поворачивается на 120 °С. Листовая заготовка попадает во вторую позицию, где осуществляется ее разогрев до высокоэластического состояния. Затем ротор вновь поворачивается на 120 °С, где в третьей позиции происходит формование изделия и его охлаждение. В это же время на первой позиции происходит выгрузка готового изделия и укладка нового листа термопласта.

Вакуум-формование осуществляется как позитивным, так и негативным методами. Выбор того или иного метода зависит от следующих факторов: требования к качеству внутренней или внешней поверхности изделий, требуемая равнотолщинность и местоположение наиболее тонких стенок изделия, угол наклона вертикальных стенок формы. При негативном формовании изделие после охлаждения в форме усаживается, а при позитивном сильно обтягивает поверхность формы, поэтому съём изделия может быть затруднен при непрерывном угле наклона вертикальных стенок формы. Минимальный угол наклона стенок формы в зависимости от типа

перерабатываемого материала составляет при негативном формовании 1-2°, а при позитивном – 3-5°.

Традиционно термоформованием перерабатываются следующие материалы: целлулоид, полиметилметакрилат (ПММА), полистирол (ПС) и его сополимеры, пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ), ПЭВД и ПЭНД, в меньших объемах – листовые полипропилен (ПП), полиамид (ПА), поликарбонат (ПК), полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и некоторые наполненные термопласты.

Наибольшей жесткостью (модулем упругости) обладают изделия из органических стекол типа ПАНМА (материал на основе акрилонитрила с метакрилатом), ПММА и ПК. Наибольшая ударная вязкость характерна для ПК, а изделия из ПММА и ПАНМА не выдерживают ударных нагрузок.

Важнейшим свойством термопластичного листового материала, предназначенного для переработки термоформованием, является его способность к значительному удлинению без разрыва. Это свойство зависит от температуры.

При глубокой вытяжке листовая заготовка деформируется пуансоном, матрицей и просто давлением воздуха. Они вытягивают разогретую заготовку по профилю формы. Выделяют три основных вида деформаций, возникающих при формовании листовой заготовки:

- 1) двухосное растяжение в плоскости листа, вызывающее натяжение материала вокруг формирующей части пуансона;
- 2) радиальное растяжение, сопровождающееся усадкой материала по периметру;
- 3) изгиб материала под натяжением.

Различие листовых материалов по способности к формованию оценивают по степени вытяжки, которую рассчитывают как отношение начальной и конечной толщины дна изделия при максимально возможной глубине вытяжки, принятой равной 0,95 от глубины вытяжки, при которой происходит разрыв изделия.

На практике под степенью вытяжки понимают отношение высоты изделия  $H$  к характерному размеру его наибольшего отверстия  $D$ , т.е.  $H/D$ . Вытяжка связана с увеличением поверхности заготовки, поэтому при вытяжке изменяется толщина листа, что оказывает влияние на механические свойства получаемого изделия.

Оптимальная глубина вытяжки зависит от природы перерабатываемого листового термопласта и от способа термоформования.

Важное значение имеет также направление вытяжки, которое определяет ориентацию цепей макромолекул полимера, а значит и

механические свойства изделия. При вытяжке в одном направлении механическая прочность изделия резко возрастает в направлении вытяжки и сильно снижается в перпендикулярном направлении. Поэтому при конструировании изделий, получаемых методами термоформования, необходимо стремиться к тому, чтобы разность степеней вытяжки в разных направлениях не превышала 50 – 60 %. Ориентация термопластов при термоформовании зависит, главным образом, от степени вытяжки и температуры формования. Повышение степени вытяжки и снижение температуры формования приводят к увеличению прочности при растяжении и ударной вязкости материала.

В зависимости от вида термоформования и применяемых формующих устройств *технологический процесс* может состоять из следующих операций: *разметка листового термопласта (получение заготовки), закрепление листовой заготовки, нагревание, предварительная вытяжка заготовки, формование, охлаждение, вырубка и извлечение готового изделия.*

#### **Расчет размеров листовой заготовки**

Рассчитать необходимые размеры листовой заготовки можно по формуле:

$$L = [nl + 2z + (n-1) z_1] \cdot (1 + Y/100) , \quad (8)$$

где  $L$  – размер листовой заготовки, мм;

$n$  – число гнезд, расположенных вдоль искомой стороны заготовки;

$l$  – размер изделия, мм;

$z$  – припуск на зажим ( $z = 1 \div 10,0$  мм в зависимости от размеров и конфигурации изделия, а также от конструкции зажимного устройства);

$z_1$  – расстояние между гнездами;

$Y$  – усадка заготовки при нагреве (зависит от температуры формования).

На практике усадку листа определяют следующим образом: вырезают из листа три образца размером 120x120 мм: один образец вырезают из центра листа, а два других на расстоянии 30 мм от каждого края. На образцах проводят две взаимоперпендикулярные линии – вдоль листа и в поперечном направлении и окружность диаметром  $100 \pm 5$  мм. Образцы помещают в термостат. Замеряют диаметр деформированной окружности в продольном и поперечном направлениях. После нагревания измеряют усадку по формуле:

$$Y = (D - D_0) \cdot 100/D , \quad (9)$$

где  $D$  и  $D_0$  – диаметр окружности до и после нагревания образца.

### Расчет времени нагрева заготовки

Наиболее часто для нагревания листов применяют инфракрасные нагреватели. При таком нагреве по толщине листа возникает большой температурный градиент  $\Delta T$ .

Разность температур на поверхностях листа зависит от мощности нагревателя, толщины листа и его теплопроводности.

В качестве нагревателей используют элементы сопротивления, изготовленные из нихромовой проволоки, лент или стержней.

Проволочные элементы со стеклянной изоляцией имеют максимальную температуру поверхности 643-693 К. Удельная мощность таких нагревателей при максимальной температуре равна 2,2 – 3,3 Вт/см<sup>2</sup>. Керамическая изоляция позволяет поднять температуру поверхности нагревателя до 873 К, а удельную мощность довести до 6 Вт/см<sup>2</sup>. Недостатком керамической изоляции является большая масса нагревателя.

Рабочая температура ленточных и стержневых нагревателей составляет 773 – 1073 К. Их удельная мощность зависит от плотности монтажа отдельных элементов и достигает 10 Вт/см<sup>2</sup>.

Рабочая температура трубчатых нагревателей достигает 1023–1273 К.

Вольфрамовая спираль кварцевых излучателей, трубка которых заполнена инертным газом, нагревается до 2473 К. Эти нагреватели работают в коротковолновом диапазоне инфракрасного излучения. Они обладают малой инерционностью и высоким КПД.

В любом случае конструкция нагревателей должна быть такой, чтобы изменение величины поверхности обогрева (за счет отключения части элементов) обеспечивало соответствие поверхности рабочей (тепловой) зоны нагревателей, поверхности любого установленного в данный момент зажимного устройства.

Приближенно продолжительность нагрева листовой заготовки можно рассчитать, определив тепловой поток, излучаемый нагревателем.

В соответствии с законом Стефана – Больцмана интенсивность излучения нагревателя  $g$  (в кДж/с) можно определить по формуле:

$$g = C_S \varepsilon \varphi S_n [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad (10)$$

$$S_n = S / (0,91 \div 0,95) \quad (11)$$

Здесь  $C_S = 5,7 \cdot 10^{-3}$  кДж / (м<sup>2</sup> · с · К<sup>4</sup>) – константа излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon = 0,8 \div 0,9$  – приведенная степень черноты для параллельных поверхностей пластика и радиационного нагревателя;

$\varphi$  – коэффициент использования лучистого потока, зависящий от соотношения размеров заготовки и нагревателя, а также от расстояния между ними (принимают  $\varphi = 0,45 \div 0,65$ );

$S_H$  – общая площадь нагревателя,  $m^2$ ;

$T_1$  – температура на поверхности нагревателя, К;

$T_2$  – средняя температура листовой заготовки за цикл нагрева, К;

$$T_2 = (T_K + T_H) / 2 \quad (12)$$

$T_H, T_K$  – начальная и конечная температура листовой заготовки, К.

Количество лучистой теплоты, которое должна получить полимерная заготовка, чтобы нагреться до требуемой температуры, можно определить по формуле:

$$E = S \delta \rho_{cp} c_{cp} (T_K - T_H), \quad (13)$$

где  $S$  – площадь листовой заготовки,  $m^2$ ;

$\delta$  – толщина заготовки, м;

$\rho_{cp}$  – среднее значение плотности полимерного листа,  $kg/m^3$ ;

$c_{cp}$  – среднее значение удельной теплоемкости в интервале температур разогрева ( $T_K - T_H$ ) (КДж/кг К).

Удельная теплоемкость  $c$  (Дж / (кг·К)) для разных полимеров при различных температурах рассчитывается следующим образом.

Технологические параметры для полиэтилена высокого давления (ПЭВД), низкого давления (ПЭНД), поливинилхлорида (ПВХ), полистирола (ПС) приведены в таблицах 1, 2, 3, 4, 5.

Таблица 1

Технологические параметры ПЭВД

$t, ^\circ C$	$c, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$
20–108 $^\circ C$	$(1,8t^3 - 249t^2 + 12600t - 26000) \cdot 10^{-2}$
108–115 $^\circ C$	$91000 - 775t$
Выше 115 $^\circ C$	$1160 + 5,24t$

Таблица 2

Технологические параметры ПЭНД

$t, ^\circ C$	$c, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$
20 – 120	$18,8t + 262$
120 – 128	$1080t + 127500$
128 – 134	$198500 - 1470t$
134 – 180	$1380 + 8t$

Таблица 3

Технологические параметры наполненного ПВХ

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$
20 – 140	$3,07t + 778$
140 – 180	$1820 - 4,48t$

Таблица 4

Технологические пластифицированного ПВХ

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$
20 – 180	$5t + 960$
180 – 200	$3660 - 10t$

Таблица 5

Технологические параметры ПС

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$
20 – 110	$7,3t + 686$
110 – 150	$246 + 8,95t$
150 - 190	$3,5t + 630$

Время нагрева листовой заготовки  $\tau_{\text{H}}$  (с) можно приближенно рассчитать по формуле:

$$\tau_{\text{H}} = E/g = S \delta \rho_{\text{ср}} c_{\text{ср}} (T_{\text{K}} - T_{\text{H}}) / C_{\text{S}} \varepsilon \varphi S_{\text{H}} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad (14)$$

### Примеры расчетов

**Пример 1.** Рассчитать необходимые размеры листовой заготовки при изготовлении упаковочной тары с размерами 120х60 мм. Исходные данные: усадка вдоль листа  $Y_{\parallel} = 18 \%$ , усадка в перпендикулярном (поперечном) направлении  $Y_{\perp} = 10 \%$ ,  $z = 15$  мм,  $z_1 = 10$  мм, число гнезд в продольном направлении листа  $n_{\parallel} = 4$ , в поперечном  $n_{\perp} = 6$ .

**Решение.**

$$L_1 = (4 \cdot 120 + 2 \cdot 15 + 3 \cdot 10) \cdot (1 + 18/100) = 637 \text{ мм}$$

$$L_2 = (6 \cdot 60 + 2 \cdot 15 + 5 \cdot 10) \cdot (1 + 10/100) = 484 \text{ мм}$$

**Пример 2.** Рассчитать время нагрева листовой заготовки из ПЭВД. Исходные данные: толщина листа  $\delta = 3$  мм; площадь  $S = 0,3 \text{ м}^2$ . Поверхность нагревателя имеет температуру  $T_1 = 700$  К. Температура нагрева заготовки  $T_{\text{K}} = 403$  К;  $T_{\text{H}} = 293$  К,  $S_{\text{H}} = 0,33 \text{ м}^2$ ;  $T_2 = (403 + 293)/2 = 348$  К. Среднюю

удельную тепло-емкость  $c_{cp}$  рассчитать при  $t=20, 60, 110, 130$  °С. Среднее значение плотности полимерного листа  $\rho_{cp} = 874$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon = 0,9$ ;  $\varphi = 0,6$ .

### Решение.

$$\tau_n = 0,3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 874 \cdot 2,8 \cdot 110 / \{ (5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,33 [7^4 - (3,48)^4]) \} = 105,8 \text{ с.}$$

### Задачи

1. Рассчитать площадь поверхности листовой заготовки при изготовлении изделия с размерами 170x110 мм. Исходные данные: усадка вдоль листа  $Y = 12$  %, усадка в перпендикулярном направлении  $Y = 8$  %;  $z = 10$  мм,  $z_1 = 10$  мм, число гнезд в продольном направлении листа  $n = 6$ , в поперечном  $n = 8$ .

2. Рассчитать размеры изделия, заготовка которой имеет размеры 520x280 мм. Исходные данные:  $Y = 15$  %,  $Y = 11$  %;  $z = 12$  мм,  $z_1 = 10$  мм,  $n = 5$ ,  $n = 7$ .

3. Рассчитать необходимые размеры листовой заготовки при изготовлении изделия с размерами 13x 5 см. Исходные данные:  $Y = 16$  %,  $Y = 9$  %;  $z = 12$  мм,  $z_1 = 1,2$  см,  $n = 4$ ,  $n = 6$ .

4. Рассчитать необходимые размеры листовой заготовки при изготовлении изделия с размерами 130x70 мм. Исходные данные:  $Y = 17$  %,  $Y = 10$  %;  $z = 9$  мм,  $z_1 = 15$  мм,  $n = 6$ ,  $n = 8$ .

5. Рассчитать необходимые размеры листовой заготовки при изготовлении изделия с размерами 110x80 мм. Исходные данные:  $Y = 15$  %,  $Y = 8$  %;  $z = 10$  мм,  $z_1 = 12$  мм,  $n = 5$ ,  $n = 10$ .

6. Рассчитать площадь поверхности листовой заготовки при изготовлении изделия с размерами 160x90 мм. Исходные данные:  $Y = 11$  %,  $Y = 6$  %;  $z = 12$  мм,  $z_1 = 15$  мм,  $n = 5$ ,  $n = 7$ .

### Контрольные вопросы

1. Какие полимеры перерабатывают методом термоформования?
2. Какими методами могут изготавливаться изделия из листовых термопластов?
3. В чем преимущество пневмоформования?
4. В чем отличие однопозиционной машины для термоформования от многопозиционной?
5. Какими методами осуществляется вакуум-формование? В чем их отличие?
6. Какое свойство термопластичного листового материала используется при термоформовании?

7. Из каких технологических операций может состоять процесс термоформования?
8. Как определяют усадку листа на практике?
9. Какие нагреватели применяют в процессе термоформования?

#### Литература

1. Шерышев, М. А. Технология переработки пластмасс. Современные особенности технологии термоформования : учебное пособие для вузов / М. А. Шерышев, А. Е. Шерышев. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 267 с.
2. Швецов Г.А. Технология переработки пластических масс / Г.А. Швецов, Д.У. Алимова, М.Д. Барышникова. – М.:Химия, 1988. –512 с.
3. Шембель А.С. Сборник задач и проблемных ситуаций по технологии переработки пластмасс / А.С. Шембель, О.М. Антипина. – Л.: Химия, 1990. – 272с.

### **Практическая работа № 9** **Стеклообразные покрытия на подложках,** **технологические расчеты роста покрытия из парогазовой фазы**

**Цель занятия:** приобретение знаний о стеклообразных покрытиях на подложках, навыков расчета роста покрытия из парогазовой фазы.

#### **Теоретическая часть работы**

Эффективным способом защиты твердых поверхностей от воздействия окружающей среды являются стеклообразные покрытия [1]. Пленки такого рода способны замедлить деградацию материалов в несколько раз. Защитные свойства стеклообразных пленок и их прочность зависят от множества факторов, среди которых не последнюю роль играет их адсорбционная способность, способность отталкивать или удерживать молекулы агрессивных паров, среди которых особый интерес в приложениях представляют пары воды.

Поверхности со стеклообразной структурой представляют повышенный интерес в связи с поиском эффективных, экологически безопасных и недорогих стимуляторов нуклеации (первой по времени наступления стадии фазового перехода) паров воды в естественной атмосфере.

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в стеклообразное характеризуется особенностями, которых нет при обычной кристаллизации, возникает твердое тело с расположением атомов, как в переохлажденном расплаве. Такое неравновесное твердое состояние называют состоянием стекла, а температуру, при которой происходит затвердевание, температурой стеклования  $T_g$  [2].

При  $T_g$  вязкость возрастает от  $10\text{--}2 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (вблизи  $T_{пл}$ ) до  $10^{12} \text{ Па}\cdot\text{с}$  (в твердом теле вязкость  $\sim 10^{16} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ).

При охлаждении переохлажденной жидкости в ней могут протекать процессы образования и роста зародышей кристаллизации. С понижением температуры частота появления зародышей кристаллизации уменьшается, а скорость их роста возрастает.

При быстром охлаждении (замораживании расплава) в процессе фазового перехода расплав - твердое тело создается метастабильное состояние твердой фазы вследствие того, что перестроение атомов в равновесное состояние (релаксация) не успевает завершиться. Свободная энергия атомов не успевает достичь минимума – равновесия. Известно, что равновесную структуру при затвердевании формируют два конкурирующих процесса: упорядочение (перестроение) атомов в кристалл и стремление системы к беспорядку.

Для каждого расплава существует критическая скорость охлаждения  $R_c$ , необходимая для стеклообразования. Способность данного сплава к стеклообразованию можно оценить по критической скорости охлаждения, но необходимо учитывать то, что  $R_c$  зависит от температурной зависимости вязкости переохлажденного расплава и теплоты плавления сплава.

Общепринятыми критериями стеклообразующей способности расплавов являются не только *критическая скорость охлаждения*  $R_c$ , но и *критический диаметр*  $D_c$ , отражающий максимально возможную толщину получающихся в результате с полностью аморфной структурой. Чем меньше значение  $R_c$  и больше значение  $D_c$ , тем выше стеклообразующая способность расплава.

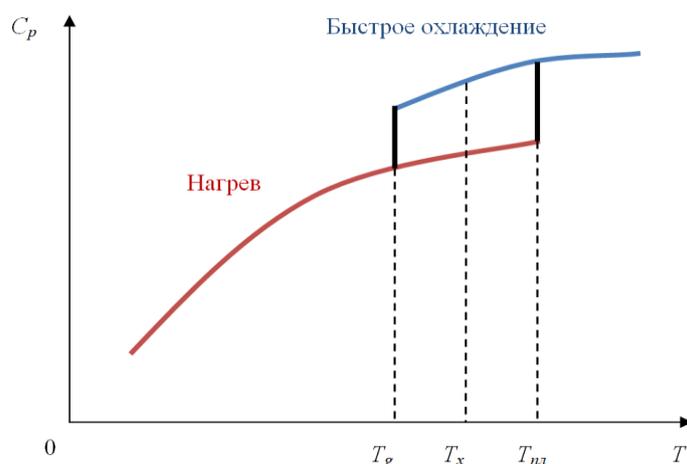


Рис. 4. Изменение теплоемкости сплава при нагревании и быстром охлаждении:  $T_g$  – температура стеклования;  $T_c$  – температура кристаллизации;  $T_{пл}$  – температура плавления [2].

Аморфизация зависит от температуры плавления сплава  $T_{пл.}$ . Приведенная температура стеклования  $T_{rg}$  определяется как отношение температуры стеклования к температуре плавления сплава

$$T_{rg} = T_g / T_{пл} \quad (15)$$

Величина приведенной температуры стеклования обычно находится в интервале значений от 0,45 до 0.65 и зависит от энергии межатомной связи.

Конденсацию из парогазовой фазы широко используют для получения полупроводниковых (молекулярно-лучевая и эпитаксия) и *диэлектрических слоев* (парофазное осаждение) и *металлических пленок* (вакуум-термическое напыление) [3].

Процессу конденсации предшествуют две последовательно протекающие стадии: *испарение* или *сублимация конденсированной* (жидкой или твердой) фазы с поверхности испарителя и *массоперенос в паровой фазе* от испарителя к подложке (поверхности конденсации). По существу процесс конденсации является третьей стадией при получении пленок; эта стадия при низкой температуре подложки (обычно температура подложки существенно ниже температуры испарителя) не лимитирует общую скорость процесса. *Лимитирующими являются либо стадия испарения (сублимация) с поверхности испарителя, либо массоперенос в паровой фазе.*

На рис. 5 поверхность испарения имеет температуру  $T_u$ , поверхность конденсации – температуру  $T_k$  ( $T_u > T_k$ ). Концентрацию компонента  $B$  в концентрированных фазах выражают в молярных долях  $x$ , а в паровой фазе – через парциальное давление  $p_B$  в объеме паровой фазы и через равновесное парциальное давление  $p_{Bu}^0$  и  $p_{Bk}^0$  у поверхности испарения и конденсации соответственно. Плотность потока и коэффициент массопередачи обозначают через  $j$  и  $\gamma$ .

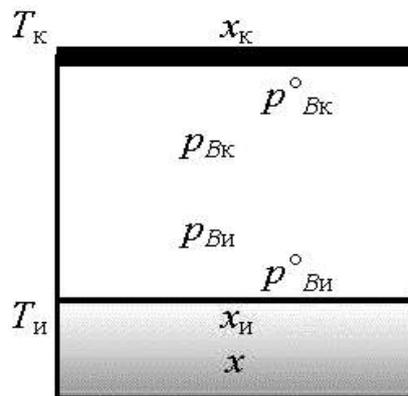


Рис. 5. Схема парогазового процесса получения покрытия [3]  
Для плотности потока  $j$  конденсирующегося компонента:

$$j = \frac{\Delta p}{R}, \quad (16)$$

где  $\Delta p = p^o_{Вн} \frac{x}{x_{и}} - p^o_{Вк}$ , а  $R = 1/\beta_{п}^{ж} + 1/k_{и} + 1/\beta_{п} + 1/k_{к}$ , где

$R$  – коэффициент массопередачи,  $\Delta p$  – движущаяся сила процесса,  $\beta_{п}^{ж} = \beta^{ж} / p^o_{Вн} \cdot \gamma_{и}$  – приведенный коэффициент массопередачи в жидкой фазе, моль/(см<sup>2</sup>·с·Па).

Для получения пленок часто применяется и метод катодного напыления. Благодаря прямолинейности молекулярного пучка он позволяет использовать так называемые «маски» для получения единой пленки заданной, иногда довольно сложной конфигурации.

Методом сублимации могут быть выращены и нитевидные кристаллы таких тугоплавких соединений, как окись магния и карбида кремния. Метод сублимации позволяет получать кристаллы, не загрязненные посторонними примесями.

Однако, широкое применение этого метода для получения полупроводниковых монокристаллов и пленок сталкивается с определенными трудностями, связанными с необходимостью создания глубокого вакуума, предохраняющего от вредного воздействия следов кислорода.

Кроме того, в процессе испарения в той или иной мере нарушается стехиометрия кристаллов полупроводниковых соединений.

*Кристаллизация с участием химической реакции.* Эта группа методов применяется для выращивания кристаллов веществ, не обладающих заметной упругостью пара ниже температуры плавления или нарушающих свою стехиометрию в процессе испарения. В нее входят методы, основанные на химических транспортных реакциях в замкнутой или открытой (проточной) системе и кристаллизация с применением так называемых парофазных реакций.

Рост кристаллов данного вещества происходит при температурах значительно более низких, чем в случае кристаллизации из расплава. Это позволяет снизить равновесную концентрацию вакансий и получать кристаллы с весьма малой плотностью дислокаций. С помощью необходимой аппаратуры можно успешно регулировать стехиометрический состав кристаллизуемого вещества. Из газовой фазы можно выращивать кристаллы тугоплавких веществ и веществ, разлагающихся при плавлении.

Термическое напыление использует два физических процесса: испарение нагретого исходного материала и конденсацию его на подложке.

Тем не менее, ключевым для процесса напыления является то, что он происходит в вакууме.

В высоком вакууме длина свободного пробега испаренных частиц больше расстояния до подложки; они могут попадать на нее без рассеяния на молекулах остаточного газа. При обычно используемом давлении 10–40 Па частица диаметром 0,4 нм имеет длину свободного пробега 60 м. За счет отсутствия столкновений частицы испаренного материала сохраняют высокую температуру, что обеспечивает их необходимую подвижность для формирования на подложке плотного слоя. Вакуум также является защитной средой, позволяющей производить испарение химически активных материалов без нарушения их химического состава.

Испаренный материал осаждается неравномерно, если подложка имеет неровную поверхность, как это часто бывает с интегральными схемами. Поскольку испаренные частицы попадают на подложку преимущественно с одного направления, выступающие детали рельефа препятствуют попаданию материала на некоторые участки поверхности. Это явление называется маскированием или затенением. Если попытаться произвести процесс напыления при плохом вакууме, полученное покрытие будет, как правило, неоднородным, пористым из-за газовых включений и не сплошным. Цвет покрытия будет отличаться от чистого материала и поверхность будет матовой (шероховатой) вне зависимости от гладкости подложки. Химический состав будет также отличаться от исходного за счет образования оксидов, гидроксидов и нитридов.

Недостатком метода является сложность напыления материалов сложного состава из-за фракционирования, происходящего благодаря разнице в давлениях пара компонентов. Этому недостатка лишен, например, метод магнетронного распыления.

Система термического напыления включает в себя, как минимум, вакуумную камеру, в которой поддерживается высокий вакуум специальной откачной системой, подложку и источник тепла, передаваемого испаряемому материалу. В качестве источника тепла могут использоваться:

- резистивные испарители, представляющие собой выполненную из проводящей керамики или тугоплавкого металла «лодочку» (называемую так благодаря своей форме), сквозь которую пропускается электрический ток, разогревающий ее;

- тигель с косвенным нагревом, электронным или индукционным. В первом случае нагрев осуществляется электронным потоком, поступающим на тигель с кольцевого катода, расположенного вокруг тигля, во втором – вихревыми токами в самом тигле, возбуждаемыми индуктором;

– электронный луч. В этом случае материал может нагреваться и испаряться локально, оставаясь в основной своей массе холодным, что позволяет иметь очень большой запас материала в тигле;

– лазерная абляция. Материал испаряется за счет нагрева в фокусе лазерного луча большой мгновенной мощности.

Для обеспечения равномерности напыления используют различные варианты вращающихся подложко-держателей. Обычно, установка оснащается системой ионной очистки подложек или нагревателем для обеспечения требуемой чистоты поверхности и адгезии.

Конденсация из паровой фазы в вакууме широко используется для получения пленок и эпитаксиальных слоев полупроводников, пленочных металлических между соединений, контактных площадок, диэлектриков, резисторов и обкладок конденсаторов.

### Практическая часть

**Задание.** Рассчитать технологические характеристики для оценки стеклообразующих способностей сплавов.

Критерии для рационализации и прогнозирования стеклообразующей способности сплавов указаны в таблице 6.

Таблица 6.

#### Справочный материал

Параметр	Уравнение
Приведенная температура стеклования	$T_{rg} = T_g / T_l$
$\Delta T_x$	$\Delta T_x = T_x - T_g$
$\alpha$	$\alpha = T_x / T_l$
$\beta$	$\beta = 1 + T_x / T_l = 1 + \alpha$
New $\beta$	$\beta = \frac{T_x \cdot T_g}{(T_l - T_x)^2}$
$\gamma$	$\gamma = \frac{T_x}{T_g + T_l}$
$\gamma_m$	$\gamma_m = \frac{2T_x - T_g}{T_l}$
$\delta$	$\delta = \frac{T_x}{T_{пл} - T_g}$
$\varphi$	$\varphi = T_{rg} \left( \frac{\Delta T_x}{T_g} \right)^{0,143}$
$\omega$	$\omega = \frac{T_g}{T_x} - \frac{2T_g}{T_g + T_{пл}}$

### Обозначения

$T_{rg}$  – приведенная температура стеклования

$T_g$  – температура стеклования

$T_l$  – температура ликвидуса (плавления)

$T_x$  – температура начала кристаллизации

$R_c$  – критическая скорость охлаждения

$D_{max}$  – критический диаметр

$\frac{T_g}{T_x}$  – термостойкость стекла

### Задачи

1. Величина температуры ликвидуса для сплава  $Pd_{82}Si_{18}$  составляет 1071 К, а температура начала кристаллизации аморфного сплава 648 К. Определите параметр для оценки стеклообразующей способности  $\beta$ .

2. Известно, что при температуре ликвидуса для сплава  $Zr_{66}Al_{18}Ni_{26}$  равной 1251 К, параметр  $\alpha$  составляет 0.566. Определите температуру стеклования сплава, если параметр  $\gamma$  равен 0.368.

3. Сплав  $La_{55}Al_{25}Ni_{15}Cu_5$  начинает кристаллизоваться при температуре 514.2 К. Необходимо найти температуру ликвидуса, если известно, что параметр  $\beta$  равен 1.669.

4. Процесс стеклования сплава  $Ti_{34}Zr_{11}Cu_{47}Ni_8$  начинается при температуре 698.4 К, при этом ширина области переохлажденной жидкости составляет 28.8К. Рассчитайте параметр для оценки стеклообразующей способности  $\omega$ , температуру ликвидуса считать равной 1169.2 К.

5. Определить термостойкость стекла  $Mg_{70}Ni_{15}Nd_{15}$ . Приведенную температуру стеклования данного сплава считать равной 0.553, а параметр  $\alpha$  равен 0.579.

6. Расплав  $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$  охлаждается с температуры ликвидуса равной 760К с необходимой критической скоростью на 347 К. После охлаждения начинается процесс стеклования. Определите температуру начала кристаллизации системы, если сплав начнут нагревать, параметр  $\gamma$  считать равным 0.403.

7. Известно, что сплав  $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$ , имеющий параметр стеклообразующей способности  $\alpha$  равный 0.590, начинает кристаллизоваться при температуре 555 К. Рассчитайте параметр для оценки стеклообразующей способности  $\beta$ , если  $\Delta T_x$  составляет 64К.

8. Определите параметр для оценки стеклообразующей способности  $\varphi$ , если известно, что приведенная температура стеклования составляет 0.54.

Температура начала кристаллизации больше температуры стеклования на 54 К. Температуру стеклования считать равной 395К.

9. Величина температуры ликвидуса сплава  $\text{Ca}_{65}\text{Mg}_{15}\text{Zn}_{20}$  составляет 630 К. Определите параметр для оценки стеклообразующей способности  $\gamma_m$ , если температура стеклования равна 375 К, а ширину области переохлажденной жидкости считать равной 35 К.

10. Дан сплав  $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47}\text{Al}_7$ , термостойкость которого равна 1.108. Рассчитайте приведенную температуру стеклования, если известно, что параметр  $\alpha$  принимает значение 0.672.

11. Сколько составляет ширина области переохлажденной жидкости сплава  $\text{Cu}_{60}\text{Hf}_{17.5}\text{Ti}_{22.5}$ , если параметр  $\alpha$  при температуре ликвидуса 1229 К составляет 0.614. Приведенная температура стеклования равна 0.569.

12. Температура ликвидуса сплава  $\text{Mg}_{65}\text{Cu}_{15}\text{Ag}_5\text{Pd}_5\text{Gd}_{10}$  составляет 748 К, а приведенная температура стеклования 0.575. Определите параметр стеклообразования  $\delta$ , если аморфный сплав начинает кристаллизоваться при температуре 472 К.

13. Рассчитайте параметр  $\alpha$ , если температура ликвидуса сплава  $\text{Ca}_{60}\text{Al}_{30}\text{Ag}_{10}$  868 К. Известно, что температура начала кристаллизации аморфного сплава равна 531 К.

14. При температуре 399 К в сплаве  $\text{Ca}_{40}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{35}$  начинается процесс стеклования. Определите параметр  $\gamma$ , если известно, что температура ликвидуса равна 680 К. Ширину области переохлажденной жидкости считать равной 37.

15. При какой температуре аморфный сплав  $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$  начнется кристаллизоваться, если температура стеклования равна 713К. Известно, что параметр  $\omega$  принимает значение 0.186, а температура ликвидуса 1151 К.

### Контрольные вопросы

1. Приведите определение стеклообразному состоянию вещества.
2. Чем отличается процесс кристаллизации и стеклования?
3. Что называется температурой стеклования?
4. Какие условия необходимо соблюдать, чтобы при непрерывном охлаждении жидкость могла перейти в твердое кристаллическое состояние?
5. Раскройте смысл понятия «переохлажденная жидкость».
6. Назовите основные критерии стеклообразования.
7. Как связаны между собой температура плавления и температура стеклования?
8. По каким параметрам можно оценивать способность сплава к стеклообразованию?

9. При каких условиях получают высокую стеклообразующую способность расплава?

10. Какими методами осуществляют конденсацию из парогазовой фазы при получении полупроводниковых, диэлектрических и металлических пленок?

11. Какие стадии предшествуют процессу конденсации из парогазовой фазы?

12. Какие стадии лимитируют образование пленочного покрытия?

13. Как определяется и от каких параметров зависит плотность потока конденсирующего компонента?

14. Какие методы основаны на кристаллизации с участием химических реакций?

15. Какие источники тепла используют при термическом напылении?

16. Приведите примеры использования конденсации из паровой фазы.

### Литература

1. Шевкунов С.В. Адсорбция на поверхности с дефектами стеклообразного типа: молекулярные механизмы и термодинамика / Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2021. Т. 57. № 4. С. 351-367.

2. Марков А.С. Стеклообразующая способность расплавов: учебно-методическое пособие / А. С. Марков, Е.О. Манакова, Р.А. Кончаков, Г.В. Афонин, В.А. Хоник. – Воронеж. ВГПУ. 2021. – 40 с.

3. Липатов Г.И. Расчеты процессов очистки и получения пленок и слоев методами физического и химического осаждения: учебное пособие. – 2019. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ. – 85 с.

### Содержание

Введение .....	3
Практическая работа № 1. ....	4
Практическая работа № 2.....	9
Практическая работа № 3. ....	16
Практическая работа № 4. ....	24

Женжурист Ирина Александровна

Технология материалов и элементов электронной техники

Практикум ч.2

по курсу

Электроника и наноэлектроника

(Кафедра материаловедения и технологии материалов КГЭУ)

*Редактор издательского отдела*